

CAPITULO IX

ANTENAS

En los capítulos anteriores se ha avanzado en el estudio del proceso de la transmisión de una señal y se ha concentrado el interés en los procesos efectuados en los equipos transmisor y receptor destacando los de traslado de frecuencias (modulación y detección).

Este capítulo estará dedicado al estudio de elementos transductores muy importantes llamados antenas que convierten la señal eléctrica en ondas electromagnéticas o las ondas electromagnéticas en señales eléctricas.

En principio cualquier conductor, por el hecho de irradiar ondas electromagnéticas, es una antena. La forma del conductor y sus dimensiones relacionadas con la longitud de onda son importantes en la determinación de la eficiencia de las antenas; esto establece un comportamiento selectivo de las antenas en relación a las frecuencias y será una antena resonante para la frecuencia para la cual habrá una mayor radiación de energía. Se podría clasificar la antena como un elemento bilateral en el sentido de que sirve, la misma antena, como transmisora o receptora con la misma eficiencia.

El primer paso que daremos será definir las propiedades características de la antena, siendo las principales el modelo de radiación, la polarización, la impedancia, la ganancia, el área efectiva, la temperatura de ruido y las propiedades mecánicas.

9.1 MODELO DE RADIACION

Un modelo de radiación es generalmente el requerimiento más básico puesto que determina la distribución espacial de la energía radiada. Normalmente se toma la energía radiada en la dirección de máxima radiación como base (energía unitaria) para expresar la energía radiada en otras direcciones relativas a la máxima. Puede tomarse también relación de intensidades de campo eléctrico y se tendrá modelos de radiación de energía normalizada o modelos de campo eléctrico.

Los modelos de radiación más conocidos son:

- a. Modelo omnidireccional ^{isotrópica} que es utilizado en radiodifusión o servicios de comunicaciones donde todas las direcciones deben cubrirse igualmente. Este modelo se muestra en la figura 9.1.1a presenta cortes horizontales y verticales circulares en el caso ideal y corresponde al radiador isotrópico. En la práctica el corte vertical no es circular.
- b. Modelo haz en lápiz que es un modelo que presenta un haz muy concentrado favoreciendo la radiación en una dirección determinada. La abertura del haz en todas las direcciones es prácticamente constante mostrando un corte transversal como se muestra en la figura 9.1.1b.
- c. Modelo de haz aplanado que es similar al modelo de haz en lápiz, siendo su principal diferencia el corte transversal que resulta elíptico como se muestra en la figura 9.1.1c.

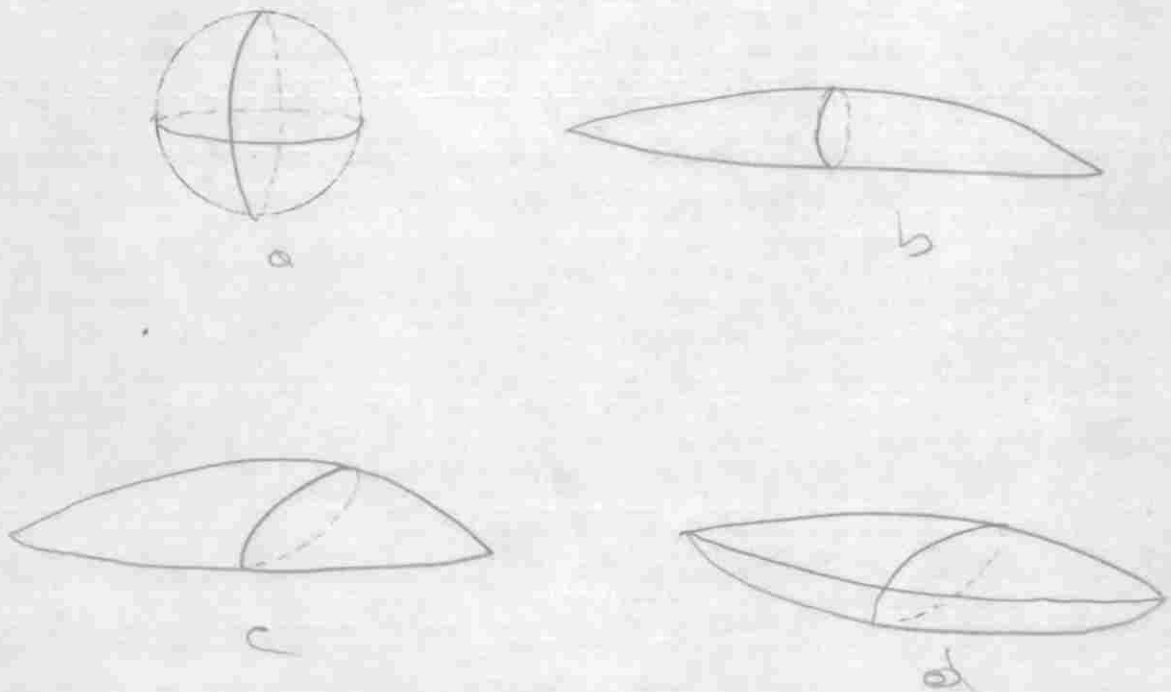


Fig. 9-1-1

- d. Modelo de haz adaptado, es un modelo en el cual se busca un cubrimiento especial sobre un plano, presentando en el otro plano principal un corte correspondiente a un haz en lápiz; en la figura 9.1.1d se muestra un ejemplo.

Además de los modelos descritos existe una buena cantidad de modelos que se indicarán en las secciones correspondientes y que presentan interés cuando se trata de enviar señales en algunas direcciones en especial.

9.2 GANANCIA

Como se acaba de ver las antenas tienen direcciones en las cuales emiten la mayor cantidad de energía y otras en las cuales la emisión es mínima. Estas consideraciones permiten hablar de la directividad de antena, definida como la relación de la intensidad de campo radiado en la dirección de máxima radiación a la intensidad de campo radiado por la misma antena. Cuando la antena es isotrópica se tiene una directividad unitaria.

La ganancia de una antena se define como la ^{relación} densidad de energía máxima radiada por la antena a la densidad de energía radiada por un radiador isotrópico alimentado con igual potencia en sus terminales de entrada. Normalmente se expresa en dB la ganancia de antena.

Puesto que la ganancia denota concentración de la energía radiada, los altos valores de ganancia son asociados con haces de pequeñas aberturas. La abertura de un haz se define como dos veces el ángulo para el cual se obtiene una densidad de energía de -3dB. La abertura del haz se indica en la figura 9.2.1 por el ángulo ϕ



Fig.9-2.1

El área efectiva de una antena esta directamente relacionada a su ganancia. Se define el área efectiva como la relación de la potencia tomada en una impedancia adaptada a la antena, tomada como receptora, a la densidad de potencia de la onda electromagnética medida en el mismo sitio de recepción

$$A_e = w_R/P \quad 9.2.1$$

donde A_e es área efectiva, w_R energía recibida y P densidad de energía radiada.

En una antena receptora al circular corriente por ella re-emite parte de la señal. La relación de esta energía re-emitida a la densidad de energía incidente es llamada área de dispersión.

La relación del potencial inducido en los terminales de una antena receptora a la intensidad de campo incidente se le llama longitud efectiva de antena.

9.3 IMPEDANCIA

Hasta ahora se ha afirmado que en la antena se puede medir una corriente y también una diferencia de potencial entre sus terminales. A la relación entre dicho potencial y la corriente se le denomina impedancia de antena. En este punto vale la pena destacar que a la antena se le puede considerar como una línea abierta. La impedancia será, en general, compleja presentando una parte reactiva que da la relación de fase y otra resistiva que da una medida de la potencia radiada o recibida por la antena; por tanto se le denomina resistencia de radiación R_r .

El conductor presenta también una baja resistencia óhmica R_L que ocasiona pérdidas; la antena se podrá representar por el circuito equivalente mostrado en la figura 9.3.1



Fig. 9-3.1

La eficiencia de la antena estará entonces determinada por la energía tomada por la resistencia de radiación R_r relacionada a la energía total disipada en $R_r + R_L$. Valores típicos de la eficiencia son del 65 al 70%.

Cuando no hay una sola antena sino un arreglo de varios elementos radiadores se altera el valor de la corriente inducida sobre la antena y también se altera el valor de la impedancia en sus términos, lo cual permite hablar de una impedancia mutua entre antenas. La relación de impedancia mutua entre dos antenas se puede tomar de las ecuaciones

$$V_1 = Z_{11} I_1 + Z_{12} I_2 \quad 9.3.1$$

$$V_2 = Z_{21} I_1 + Z_{22} I_2 \quad 9.3.2$$

cuando $I_1 = 0$ de la ecuación 9.3.1 se tendrá la impedancia mutua entre las antenas 2 y 1 así:

$$Z_{12} = V_1 / I_2$$

9.4 POLARIZACION

Ante la existencia de cargas eléctricas, el campo eléctrico está dirigido de las cargas positivas hacia las cargas negativas, de manera que al circular una corriente se crea un campo eléctrico dirigido en sentido opuesto al de la corriente.

En campos creados por una antena se toma la dirección que ellos toman para definir la polarización de la antena si el campo es dirigido verticalmente se hablará de una polarización vertical. Cuando el ángulo de inclinación es diferente de cero o de $\pi/2$ resulta más apropiado referir las componentes del campo en las direcciones de las componentes polares r y θ para evitar confusión.

Cuando se produce polarización en direcciones no proyectadas en el diseño de la antena se afirma que existe polarización cruzada que necesariamente produce pérdida de señal.

Además existen antenas que tienen polarización circular o elíptica dependiendo de la geometría de la antena.

9.5 TEMPERATURA DE RUIDO

En una antena receptora se tiene que además de la señal deseada se tiene en el receptor otras señales que constituyen el ruido.

Esta señal de ruido incluye el efecto de descargas atmosféricas ruido de cuerpos celestes, etc. Estos componentes de ruido se pueden relacionar con el ruido térmico o agitación molecular y de allí la razón de hablar de una temperatura de ruido que se obtiene por la relación

$$T_r = w_n / kB$$

w_n : potencia promedio
de ruido. 9.5.1

donde T_r es la temperatura de ruido, k la constante de Bodztmann y B la banda de frecuencias recibida.

Se mide también por la figura de ruido F

$$F = 1 + T_r / T_0$$

donde $T_0 = 290^\circ\text{K}$.

9.6 BANDA PASANTE

A diferencia de las demás propiedades electromagnéticas de las antenas, la banda pasante no puede ser definida de una manera única. La banda pasante puede determinarse en base al modelo de radiación, a pérdidas en el valor de la ganancia, a cambios en las características de polarización o a deterioro de las características de impedancia. Se trata de establecer para una antena y para una aplicación en particular cual característica resulta más interesante.

9.7 PROPIEDADES MECANICAS

Las propiedades mecánicas tienen que ver fundamentalmente con las antenas colocadas a interperie que deben estar sobre montajes que opongan buena resistencia al esfuerzo que son sometidas por vientos, y estar protegida contra efectos de humedad o contra la nieve en lugares donde ella caiga.

9.8 RADIACION DE ENERGIA

El estudio de los campos electromagnéticos podría resumirse para la parte que nos interesa en el análisis y las ecuaciones de Maxwell que en su forma clásica pueden ser planteadas así:

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad 9.8.1$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad 9.8.2$$

$$\nabla \times \vec{E} = -j\omega \vec{B} \quad 9.8.3$$

$$\nabla \times \vec{B} = \vec{I} + j\omega \vec{D} \quad 9.8.4$$

para funciones periódicas de la forma compleja $e^{j\omega t}$ con frecuencia angular ω .

El vector de Poynting expresa la densidad de energía en un punto del espacio donde hay campos \vec{E} y \vec{H}

$$\vec{P} = \vec{E} \times \vec{H} \quad 9.8.5$$

Puesto que las perturbaciones avanzan con la velocidad de la luz (perturbaciones u ondas electromagnéticas) es necesario hablar del vector de potencial retardado

$$\vec{A} = \mu \int_V \frac{\vec{I}(t - r/v) dV}{4\pi r} \quad 9.8.6$$

con

$$v = 1/\sqrt{\mu\epsilon}$$

Donde r es la distancia del punto en consideración al elemento radiador, I la corriente a lo largo de este último y v la velocidad de propagación de la onda.

De la misma teoría de Maxwell se desprende que conocido el vector de potencial se puede determinar las intensidades de campo \vec{E} y \vec{H} por las siguientes relaciones .

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad 9.8.7$$

$$E = -j\omega \left(\vec{A} + \frac{1}{k^2} \nabla (\nabla \cdot \vec{A}) \right) \quad 9.8.8$$

donde k es el número de onda $k = \omega \sqrt{\mu\epsilon}$

9.9 DIPOLO HERTZIANO

Para iniciar el estudio de las antenas lo más apropiado es hacer lo por el dipolo elemental o hertziano, un alambre con terminales en su parte central y longitud muy corta relativa a la longitud de onda. De acuerdo con la figura 9.9.1a y la ecuación 9.3.6 se tiene

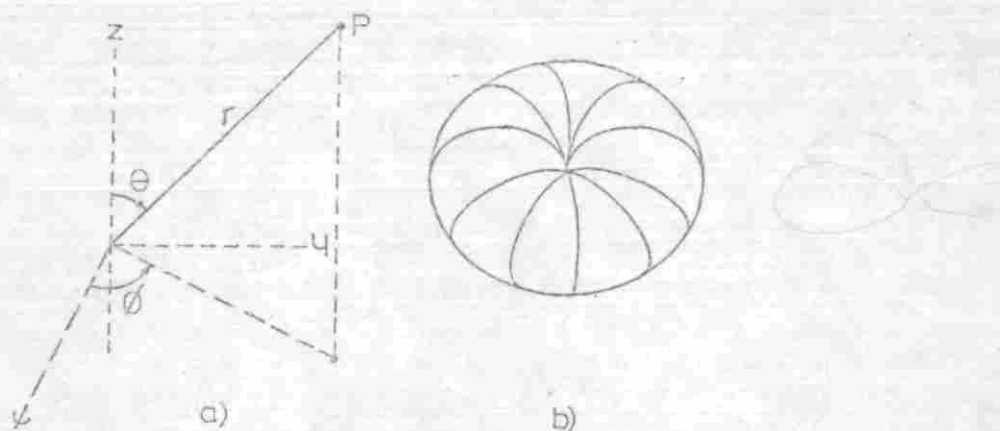


Fig. 9-9.1

$$A_z = \mu \int \frac{I_z (t - r/v) dz}{4 \pi r}$$

de donde

$$A_z = \frac{\mu I_0 l}{4 \pi r} \cos w(t - r/v) \quad 9.8.9$$

con I_z considerada senoidal y orientada en el sentido de la z .

Llevado el sistema de coordenadas esféricas se tendrá

$$A_r = \frac{\mu l I_0}{4 \pi r} e^{-jkr} \cos \theta \quad 9.8.10$$

$$A = - \frac{\mu l I_0}{4 \pi r} e^{-jkr} \sin \theta \quad 9.8.11$$

Desarrollando la ecuación 9.8.7 en coordenadas esféricas se tendrá

$$B_r = 0; \quad B_\theta = 0 \text{ y } B_\phi = \frac{\mu l I_0}{4} e^{-jkr} \left(\frac{jk}{r} + \frac{1}{r^2} \right) \sin \theta \quad 9.8.12$$

De la ecuación 9.8.8 se obtiene

$$E_r = \frac{I_0 l}{4 \pi} e^{-jkr} \left(\frac{2 \eta}{r^2} - \frac{2}{jw \epsilon r^3} \right) \cos \theta \quad 9.8.13$$

$$E_\theta = \frac{I_0 l}{4 \pi} e^{-jkr} \left(\frac{jw \mu}{r} + \frac{1}{jw \epsilon r^3} + \frac{\eta}{r^2} \right) \sin \theta \quad 9.8.14$$

$$E_\phi = 0 \quad 9.8.15$$

$$\text{con } \eta = \sqrt{\mu/\epsilon} = 120 \pi$$

Si el punto P es cercano al dipolo elemental las ecuaciones 9.8.13, 9.8.14 y 9.8.15 se reducen a

$$H_\phi = \frac{I_0 l}{4 \pi r^2} e^{-jkr} \sin \theta \quad 9.8.16$$

$$E_r = \frac{I_0 l}{j 2 \pi w \epsilon r^3} e^{-jkr} \cos \theta \quad 9.8.17$$

$$E_\theta = \frac{I_0 l}{j 4 \pi w \epsilon r^3} e^{-jkr} \sin \theta \quad 9.8.18$$

De manera que el campo magnético está casi en fase con la corriente y H_ϕ puede identificarse con el que se puede obtener por la ley de Ampère. Los fasores de campos eléctricos y magnético tienen un defasaje de 90° .

A grandes distancias del dipolo las ecuaciones 9.8.13, 9.8.14 y 9.8.15 se reducen a

$$H_\phi = \frac{jk I_0 l}{4 \pi r} \sin \theta e^{-jkr} \quad 9.8.19$$

$$E_\theta = \frac{jw\mu I_0 l}{4 \pi r} \sin \theta e^{-jkr} = H \quad 9.8.20$$

El vector de Poynting está en la dirección radial

$$P_r = |E_\theta| |H_\phi| = \frac{\eta k^2 I_0^2 l^2}{32 \pi^2 r^2} \sin^2 \theta \quad 9.8.21$$

E_θ y H_ϕ están en fase en el tiempo. La potencia promedio se puede calcular

$$w_p = 40 \pi^2 I_0^2 (l/\lambda)^2 \quad 9.8.22$$

La resistencia de radiación puede ser obtenida por

$$R_r = w_p / I_{ef}^2 = 80 \pi^2 (l/\lambda)^2 \quad 9.8.23$$

El modelo de radiación es de forma anular como se muestra en la figura 9.9.1b.

9.10 ANTENA RECTA LARGA

Si la longitud de la antena es comparable con la longitud de la señal a transmitir, lo cual ocurre fácilmente, la distribución de corriente no será uniforme a lo largo de la antena sino que habrá una distribución lineal, como muestra la figura 9.10.1a, cuando $L < \lambda/60$; ó senoidal, como se muestra en la figura 9.10.b, cuando $L > \lambda/60$

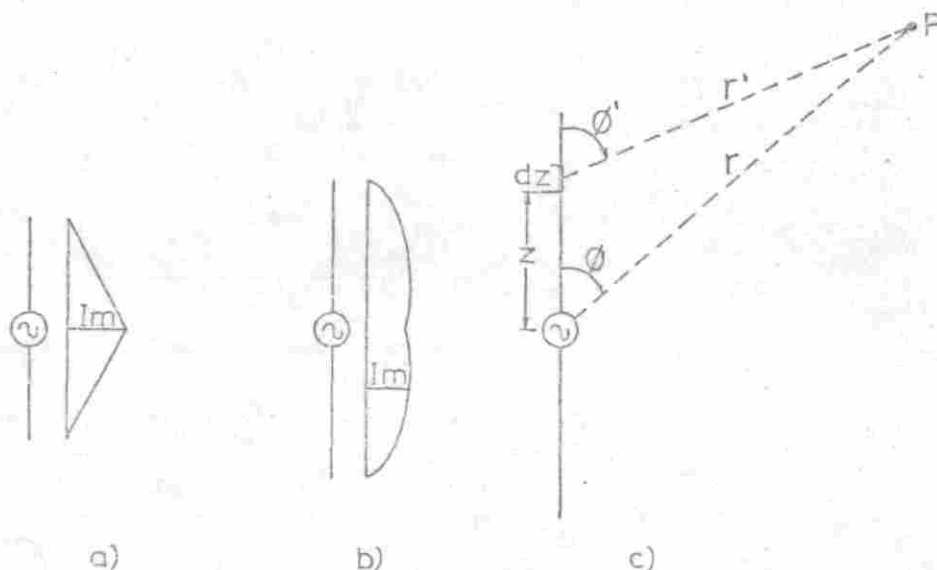


Fig. 9-10.1

Para la distribución indicada en la figura 9.10.1 se tiene.

$$I(z) = \begin{cases} I_m \sin k(L-z) & z > 0 \\ I_m \sin k(L+z) & z \leq 0 \end{cases} \quad 9.10.1$$

Tomando como base la figura 9.10.1 se tendrá en P como efecto de la corriente que circula por el elemento dz , acorde con la ecuación 9.8.19 y 9.8.20

$$dE_\theta = \eta dH_\phi = \frac{j\eta I dz}{4\pi r^2} e^{-jkr} \sin \theta$$

de la figura puede establecerse

$$r^1 = \sqrt{r^2 + z^2 - 2 r z \cos \theta} \simeq r - z \cos \theta$$

y

$$r^1 \simeq r$$

Calculando $E_{\theta} = \eta H_z = \int_{-z/2}^{z/2} dE_{\theta}$

Se llega a las siguientes relaciones

$$E_{\theta} = \frac{j\eta \text{Im}}{\lambda \pi r} e^{-jkr} \frac{\cos(kL/2 \cos \theta) - \cos(kL/2)}{\sin \theta} \quad 9.10.2$$

$$P_r = \frac{\eta \text{Im}^2}{8 \pi^2 r^2} \left(\frac{\cos(kL/2 \cos \theta) - \cos kL/2}{\sin \theta} \right)^2 \quad 9.10.3$$

$$y \quad R_r = \frac{2w}{\text{Im}^2} = \frac{\eta}{4\pi} \int \left(\frac{\cos(kL/2 \cos \theta) - \cos kL/2}{\sin \theta} \right)^2 d\theta \quad 9.10.3$$

La solución de la integral establece

$$\begin{aligned} R_r = & 6Q(C + \ln 2KL - C_i(2KL) \\ & + \frac{1}{2} \sin 2KL (Si(4KL) - 2 Si(2KL)) \\ & + \frac{1}{2} \cos 2KL (C + \ln(KL) + C_i(4KL) - 2 C_i(2KL)) \end{aligned}$$

9.10.4

donde $Si(x) = \int_0^x \frac{\sin t}{t} dt$

es la integral seno y

$$C_i(x) = \int_x^{\infty} \frac{\cos t}{t} dt$$

la integral coseno

y $C = 0.5772$

El modelo de radiación y evidentemente la resistencia de la antena de alambre larga esta determinada por la longitud relativa de la antena a la longitud de onda, L/λ

En las figuras 9.10.2 a, b, c, d, e, f se muestra los patrones de radiación para $L/\lambda = 1/2, 1, 3/2, 2, 3, 4$ y 5 respectivamente y los valores aproximados de resistencia de radiación en su respectivo orden de 73, 89, 104, 112, 123, 132 y 140 Ω .

En relación a los modelos de radiación se tiene que las gráficas de la figura 9.10.2 corresponden a cortes verticales y los modelos tridimensionales son los que resultan de girar cada gráfica sobre el eje mismo de cada antena. Se puede observar que al aumentar la longitud relativa de la antena los lóbulos mayores del modelo se van alineando cada vez más con el eje de la antena.

Cuando la longitud de la antena es de media longitud de onda o un número par o impar de semilongitudes de onda se llaman antenas de Hertz y pueden ser montadas en posición vertical u horizontal. Para frecuencias bajas y medias con antenas largas las de Hertz encuentran poco uso a excepción de las transmisiones comerciales fijas donde hay espacios para ellas. Para transmisión AM en radio difusión se usan antenas $\lambda/2$ y $5\lambda/8$ y se han montado hasta de 300 metros y algo más. En frecuencias medias y altas se usan para transmisiones simples debido a que son antenas resonantes.

Cuando las antenas se instalan en posición vertical se puede usar la característica conductora de la tierra para reducir la altura física de la antena a la mitad, como se muestra en la figura 9.10.3a, por el efecto de carga imagen se tendrá una antena imagen con corriente circulando en el mismo sentido de la antena real de manera que el modelo de radiación sobre la superficie terrestre se altera para tomar la forma del correspondiente a una antena de longitud doble aunque no se altera el valor de la resistencia de radiación.

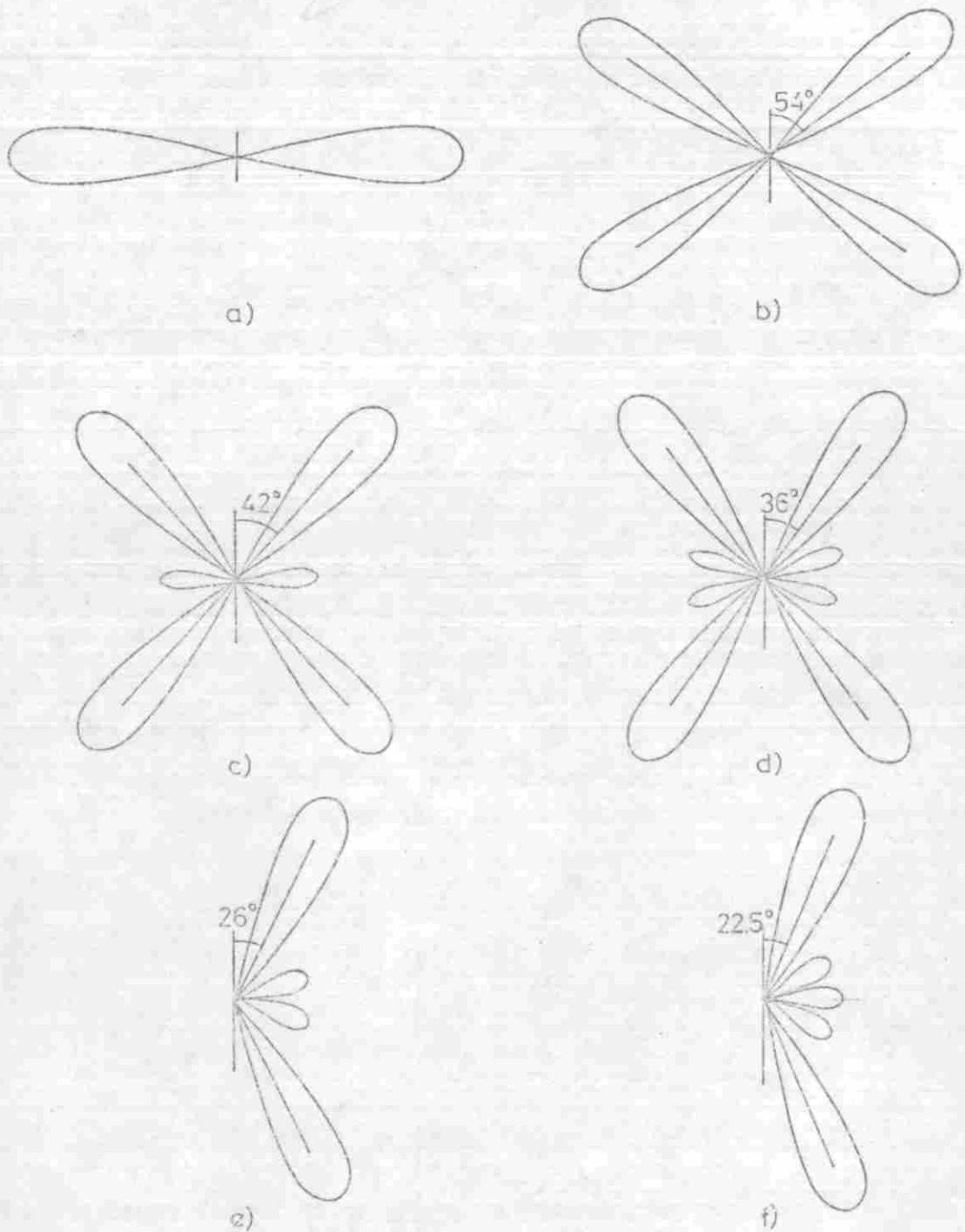


Fig. 9-10.2

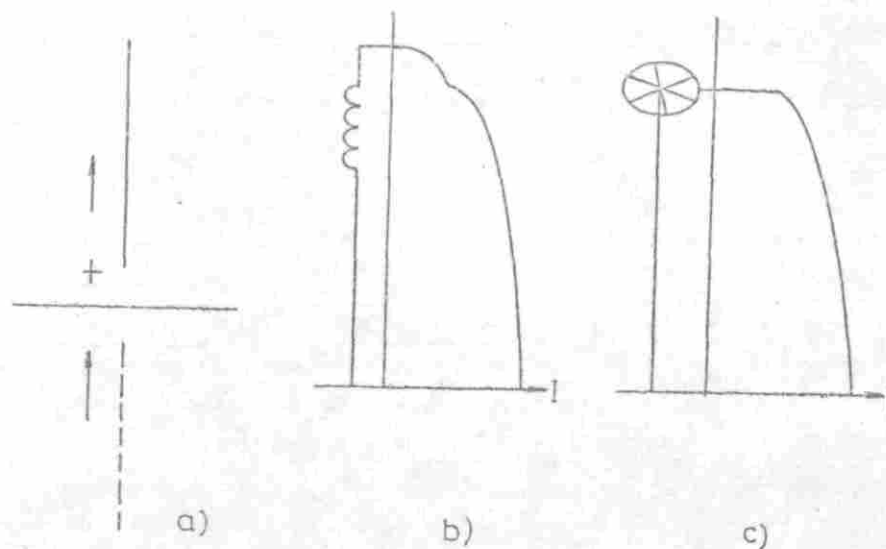


Fig. 9-10.3

Las antenas de longitud $\lambda/4$ o múltiplos impares de cuartos de longitud de onda son llamadas antenas de Marconi cuando se conecta un terminal del transmisor o receptor a la antena y el otro a tierra presenta una resistencia de radiación de 36.3Ω ($L = \lambda/4$) y las características propias de una antena Hertz de longitud de $\lambda/2$.

Otra forma de aumentar la longitud eléctrica de la antena se muestra en las figuras 9.10.3b y c, consiste en adicionar una inductancia o un plato o dispositivo conductor que pueda conservar carga para obtener las distribuciones de corriente mostradas en las mismas figuras.

9.11 ANTENA BEVERAGE

La antena de onda completa o Beverage es un alambre horizontal de una o más longitudes de onda de largo, que termina en un extremo en una impedancia de valor igual a su impedancia característica. Generalmente se colocan a alturas entre 3 y 6 m. sobre la superficie terrestre, puede considerarse como una línea de solo un conductor con retorno a tierra. Se muestra una antena Beverage en la figura 9.11.1, se puede usar en recepción para varias frecuencias puesto que no es una frecuencia re-

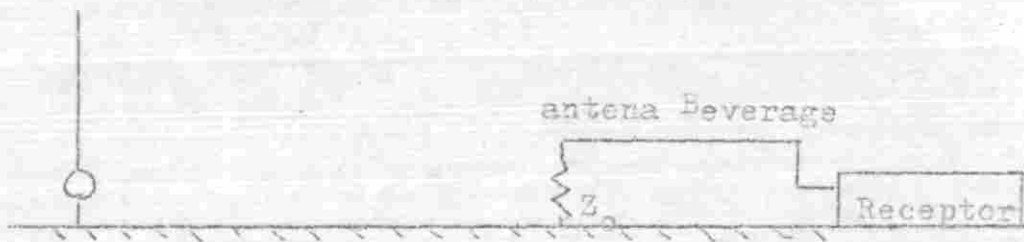


Fig. 9.11.1

sonante, pero no es recomendable como antena transmisora por sus altas pérdidas. La figura 9.11.1 muestra emisión con onda de polarización vertical pero debido al efecto conductor de la superficie terrestre con algunas pérdidas va sufriendo una inclinación que al llegar a la antena Beverage la componente horizontal inducirá corriente en la antena y gracias a dicha componente habrá recepción.

9.12 ANTENA SEMIRRÓMBICA

La antena semirrómica llamada también u invertida por su disposición esta constituida por un alambre largo, como se muestra en la figura 9.12.1 terminada en un extremo por una impedancia igual a su impedancia característica y conectada en su segundo terminal al equipo transmisor.

Se debe tener en cuenta para su diseño la longitud relativa de la antena a la longitud de onda para determinar el ángulo puesto que el objetivo es alinear los lóbulos a y b del modelo de radiación de manera que se refuerza la radiación en la dirección indicada por el vector e.

Para avanzar en su análisis debemos partir del hecho de considerar la antena semirrómica compuesta por dos conductores que forman un ángulo 2ϕ . Puesto que el lóbulo a esta orientado formando un ángulo θ sobre el radiador BB se tiene la relación $\phi = \pi - \theta$ o sea que θ y ϕ son ángulos complementarios. En relación a los lóbulos c y d tienen componentes verticales opuestas y las componentes horizontales se refuerzan por estar dirigidas en el mismo sentido.

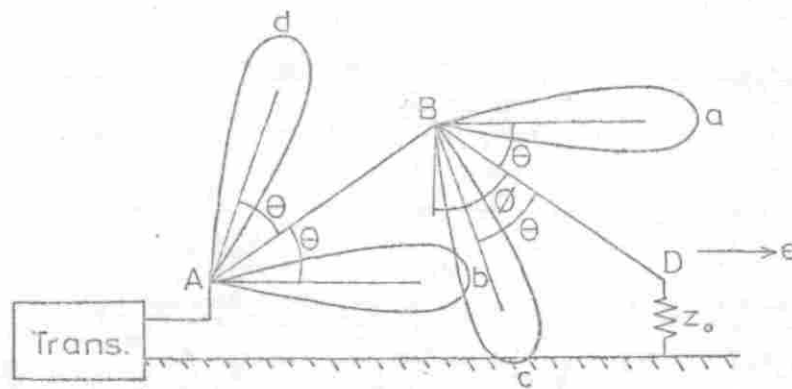


Fig. 9-12.1

Por las dimensiones del terreno necesario y la relativa dificultad de su montaje se usa para transmisiones fijas punto a punto.

9.13 ANTENA ROMBICA

La antena r6mbica constituye una mejora de la antena semirr6mbica en cuanto a directividad se refiere debido a que aumenta la radiaci6n en la direcci6n del terminal en el cual se ha colocado la impedancia adaptada.

La ubicaci6n sobre el terreno es tal que el rombo est1 en una superficie paralela a la del terreno. En la figura 9.13.1 se mues-

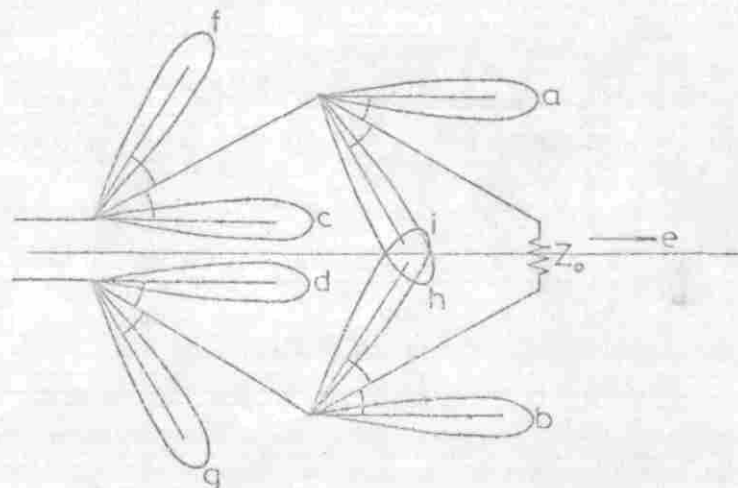


Fig. 9-13.1

tra una vista superior de la antena rómbica con los correspondientes lóbulos de radiación de los cuales se puede observar , a b c y d están dirigidos según el vector e y los lóbulos f g h i presentan componentes en la misma dirección que se suman mientras que las componentes normales se oponen dos a dos ofreciendo una mayor extensión. Los criterios del diseño son similares a los empleados para el diseño de la semirrómbica.

9.14 ARREGLOS DE ANTENAS

Cuando se disponen dos o más antenas para la transmisión o recepción se habla de un arreglo de antenas. Si todos los elementos están conectados al equipo transmisor o receptor se refieren como elementos activos. Si por el contrario solo se unen algunos elementos, los no conectados serán elementos pasivos.

El primer arreglo que estudiaremos será el llamado dipolo plegado constituido por un radiador de longitud igual a media longitud de onda central a los extremos del cual se une un segundo radiador de una sola pieza como se muestra en la figura 9.14.1a en el caso práctico no corresponde a la unión de dos elementos separados sino que se le da la forma mostrada en la figura aun a una pieza metálica que puede ser un tubo de aluminio.

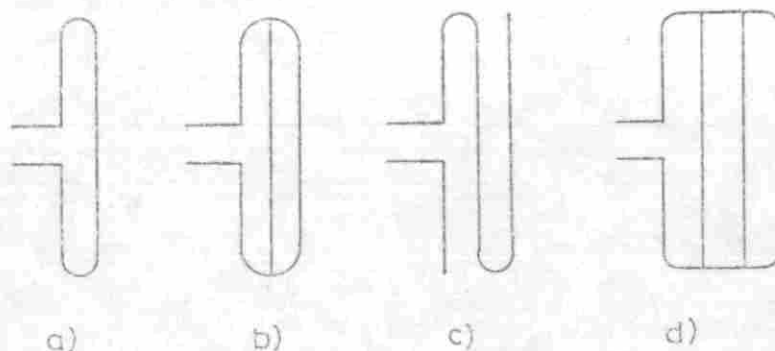


Fig. 9-14.1

También se puede construir dipolos plegados múltiples y de diversas formas como los mostrados en las figuras 9.14.1b c y d. La longitud más usada para estos radiadores es $\lambda/2$.

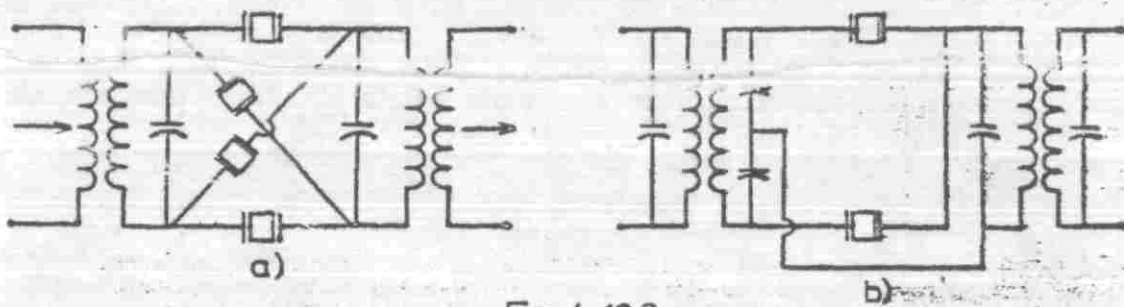


Fig. 4-12.3

Filtros Mecánicos:

Otra manera de obtener la selectividad en la generación de modulación en BLU basada en filtros consiste en el empleo de filtros pasabanda del tipo electromecánicos, como el mostrado en la figura 4.12.4a. Consiste de un transductor de entrada, una sección resonante mecánica, un transductor de salida y un juego de imanes de polarización para los transductores. El transductor de entrada pone en vibración los discos de la sección resonante, por efecto magnetostrictivo. En efecto la varilla impulsora sufre una variación de longitud cuando se halla expuesta al campo magnético producido por la señal de entrada al circular por la bobina del transductor. El efecto magnetostrictivo de una varilla de níquel es el mostrado cualitativamente en la figura 4.12.4b haciéndose necesario un imán de polarización para llevar el punto de funcionamiento a la región central de la curva.

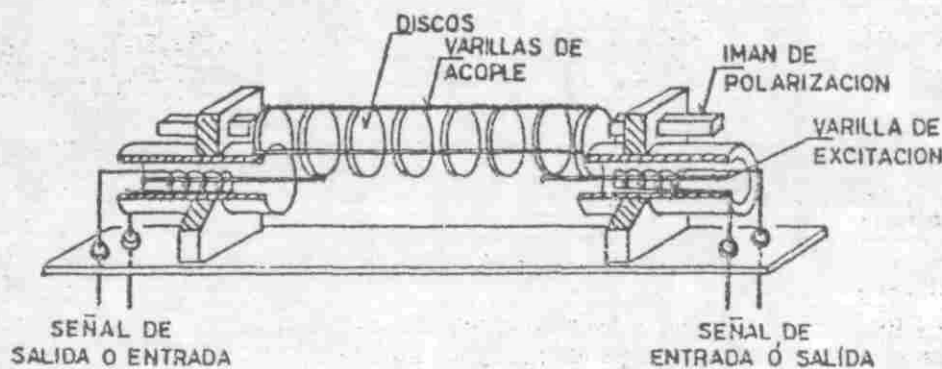


Fig. 4.12.4

BLU se basa en el empleo de filtros de cristal de cuarzo. Este tipo de filtro, como su nombre lo indica, utiliza cristales de cuarzo como elementos de filtro. El cristal de cuarzo tiene como circuito equivalente el mostrado en la figura 4.12.1a. La

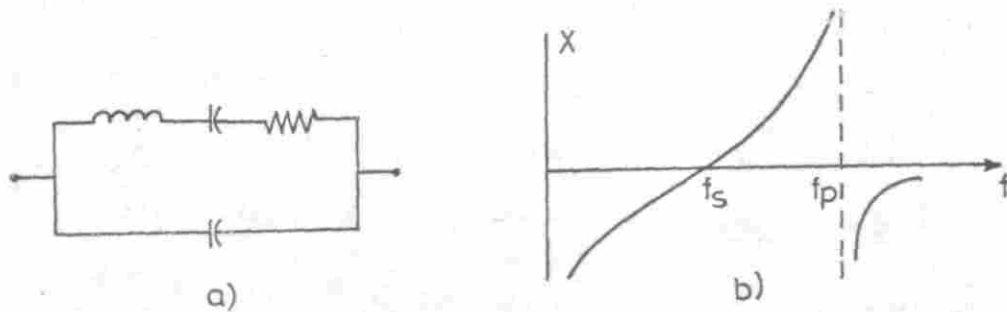


Fig. 4 -12.1

reactancia de este circuito tiene un comportamiento como el indicado por la figura 4.12.1b, con dos frecuencias de resonancia, una resonancia serie f_s , y otra de resonancia paralela f_p . Por lo general estas dos frecuencias solo difieren en algunos centenares de Hz. Si se conecta una bobina en paralelo con el cristal, el gráfico de reactancias del circuito indica que hay ahora una segunda frecuencia de resonancia en paralelo como se ve en la figura 4.12.2.

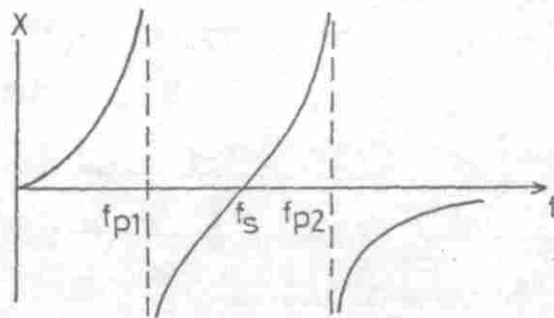


Fig. 4 -12.2

Estos efectos se pueden acentuar en las conformaciones enpuente mostradas en los circuitos de las figuras 4.12.3a y 4.12.3b produciendo bandas pasantes suficientemente reducidas.

portadoras entre 88 y 108 Mhz. Para la transmisión de la señal de audio en una señal de TV se emplea una desviación de 25 khz. Las anotaciones hechas arriba corresponden a radiodifusión.

En la figura 4.16.2 se hace un análisis comparativo del espec -

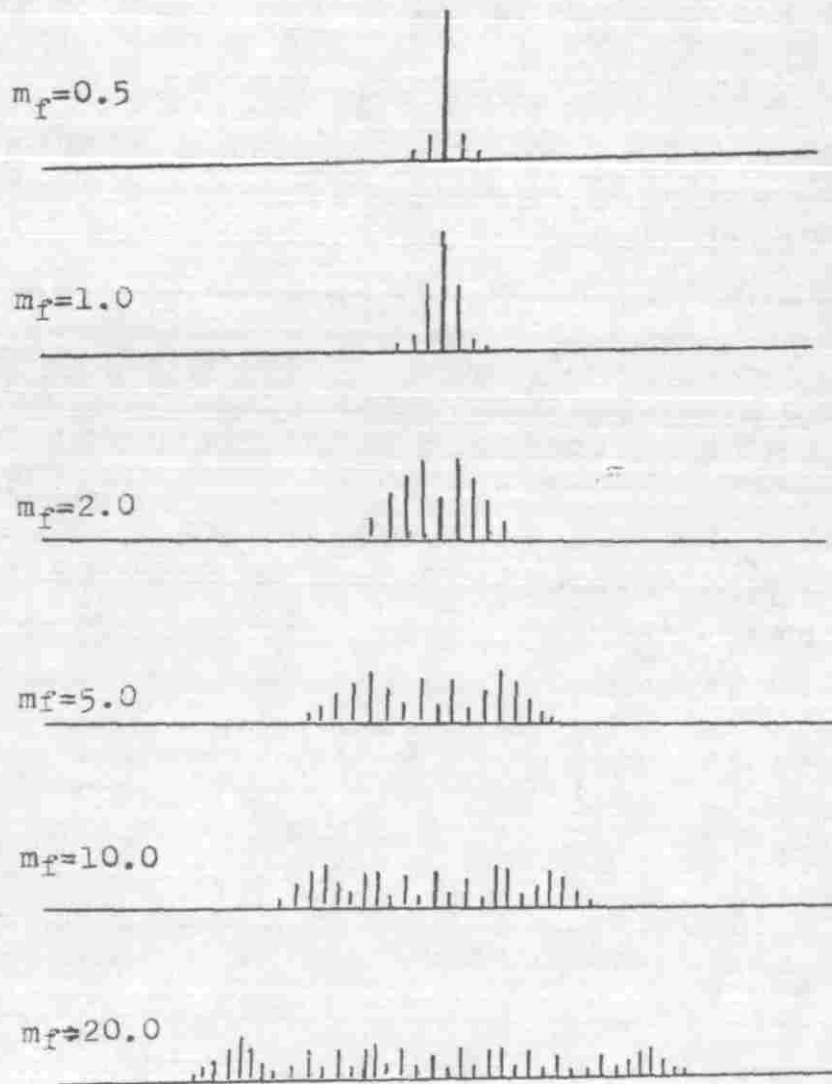


Fig. 4.16.2

tro de una señal FM para un cierto valor de frecuencia moduladora pero para diferentes valores del índice de modulación.

Cuando la señal moduladora es compleja, el espectro de frecuencias se hace más complicado; las bandas incluyen no solamente las que se obtienen con cada frecuencia moduladora separadamente sino también varias combinaciones de frecuencias. Sin embargo, aunque una frecuencia moduladora compleja aumenta el número de frecuencias componentes de la señal FM esto no aumenta el ancho de banda ocupado por la señal.

El análisis de las señales de frecuencia modulada puede dividirse en dos partes: modulación FM de banda angosta con $m_f \leq 0.5$ y FM de banda ancha para el cual $m_f > 0.5$.

EL SISTEMA FM DE BANDA ANGOSTA ofrece un espectro de frecuencia similar al sistema AM. Para su demostración se puede hacer el siguiente análisis. Según la gráfica de la figura 4.16.1 se observa que las funciones o polinomios de Bessel para valores del argumento superiores a 0.5 son prácticamente nulos para órdenes $n > 2$. Como consecuencia la ecuación 4.16.4 se reduce a

$$v(t) = V_p J_0 \cos w_p t + V_p J_1(m_f) \{ \cos(w_p + w_m)t - \cos(w_p - w_m)t \} \quad 4.16.5$$

que puede escribirse

$$v(t) = J_0(m_f) V_p \cos w_p t - 2 J_1(m_f) V_p \sin w_p t \sin w_m t \quad 4.16.6$$

De la ecuación 4.16.6 se deduce que la señal FM de banda angosta tiene como componentes señales en las frecuencias $f_p + f_m$ y $f_p - f_m$ que corresponden a la portadora y dos frecuencias laterales respectivamente.

La anterior afirmación nos permite relacionar la señal FM de banda angosta con una señal AM pero es apropiado precisar las diferencias básicas entre estas señales. Se obtienen por diferentes métodos de modulación.

La señal AM tiene de acuerdo a la ecuación 4.3.1 componentes que se suman fasorialmente como se muestra en la figura 4.16.3a; la resultante de las frecuencias laterales resulta sumada linealmente con la portadora. La señal FM de banda angosta de acuerdo

Los modelos de radiación más conocidos son:

- a. Modelo omnidireccional que es utilizado en radiodifusión o servicios de comunicaciones donde todas las direcciones deben cubrirse igualmente. Este modelo se muestra en la figura 9.1.1a presenta cortes horizontales y verticales circulares en el caso ideal y corresponde al radiador isotrópico. En la práctica el corte vertical no es circular.
- b. Modelo haz en lápiz que es un modelo que presenta un haz muy concentrado favoreciendo la radiación en una dirección determinada. La abertura del haz en todas las direcciones es prácticamente constante mostrando un corte transversal como se muestra en la figura 9.1.1b.
- c. Modelo de haz aplanado que es similar al modelo de haz en lápiz, siendo su principal diferencia el corte transversal que resulta elíptico como se muestra en la figura 9.1.1c.

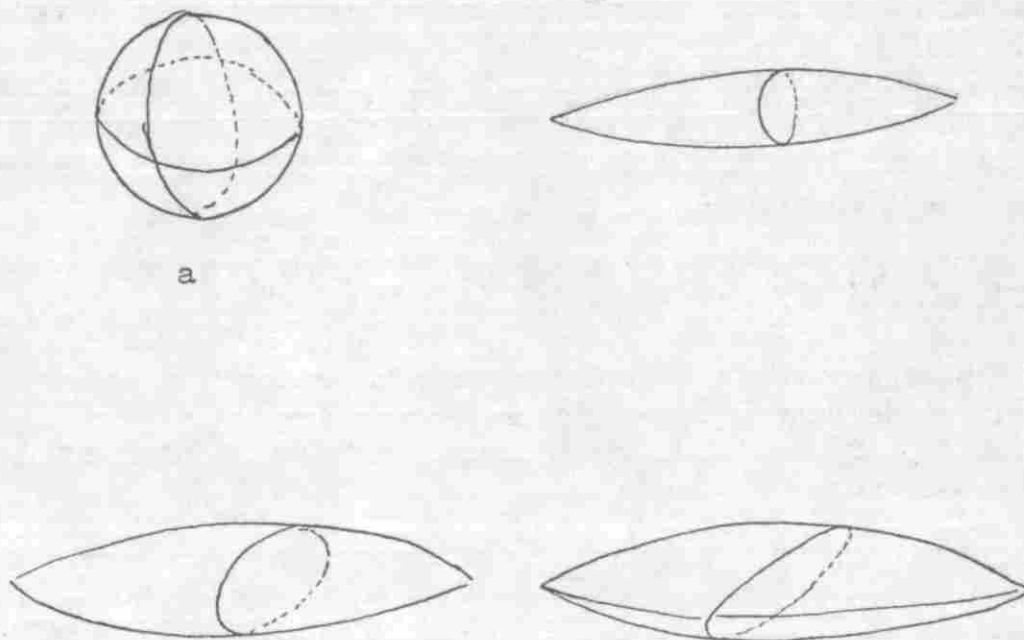


Fig. 9.1.1

- d. Modelo de haz adaptado, es un modelo en el cual se busca un cubrimiento especial sobre un plano, presentando en el otro plano principal un corte correspondiente a un haz en lápiz; en la figura 9.1.1d se muestra un ejemplo.

Además de los modelos descritos existe una buena cantidad de modelos que se indicarán en las secciones correspondientes y que presentan interés cuando se trata de enviar señales en algunas direcciones en especial.

9.2 GANANCIA

Como se acaba de ver las antenas tienen direcciones en las cuales emiten la mayor cantidad de energía y otras en las cuales la emisión es mínima. Estas consideraciones permiten hablar de la directividad de antena, definida como la relación de la intensidad de campo radiado en la dirección de máxima radiación a la intensidad de campo radiado por la misma antena. Cuando la antena es isotrópica se tiene una directividad unitaria.

La ganancia de una antena se define como la densidad de energía máxima radiada por la antena a la densidad de energía radiada por un radiador isotrópico alimentado con igual potencia en sus terminales de entrada. Normalmente se expresa en dB la ganancia de antena.

Puesto que la ganancia denota concentración de la energía radiada, los altos valores de ganancia son asociados con haces de pequeñas aberturas. La abertura de un haz se define como dos veces el ángulo para el cual se obtiene una densidad de energía de -3dB. La abertura del haz se indica en la figura 9.2.1 por el ángulo

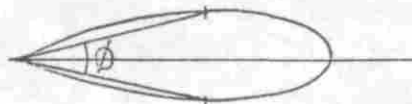


Fig.9-2.1

tra una vista superior de la antena rómbica con los correspondientes lóbulos de radiación de los cuales se puede observar , a b c y d están dirigidos según el vector e y los lóbulos f g h i presentan componentes en la misma dirección que se suman mientras que las componentes normales se oponen dos a dos ofreciendo una mayor extensión. Los criterios del diseño son similares a los empleados para el diseño de la semirróbica.

9.14 ARREGLOS DE ANTENAS

Cuando se disponen dos o más antenas para la transmisión o recepción se habla de un arreglo de antenas. Si todos los elementos están conectados al equipo transmisor o receptor se refieren como elementos activos. Si por el contrario solo se unen algunos elementos, los no conectados serán elementos pasivos.

El primer arreglo que estudiaremos será el llamado dipolo plegado constituido por un radiador de longitud igual a media longitud de onda central a los extremos del cual se une un segundo radiador de una sola pieza como se muestra en la figura 9.14.1a en el caso práctico no corresponde a la unión de dos elementos separados sino que se le da la forma mostrada en la figura a una pieza metálica que puede ser un tubo de aluminio.

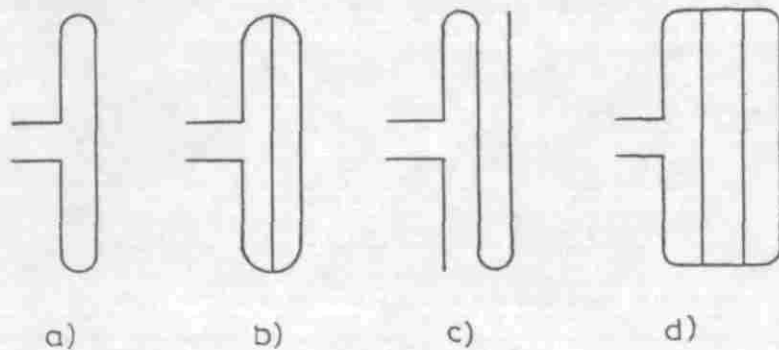


Fig. 9-14.1

También se puede construir dipolos plegados múltiples y de diversas formas como los mostrados en las figuras 9.14.1b c y d. La longitud más usada para estos radiadores es $\lambda/2$.

El distanciamiento entre los diferentes radiadores debe ser menor que $0,1\lambda$ donde λ es la longitud de onda correspondiente a la frecuencia de trabajo.

La resistencia de radiación para estos dipolos plegados - esta relacionada a la resistencia de radiación de un dipolo simple de igual longitud por la igualdad.

$$R_{rd} = N^2 R_r \quad 9.14.1$$

donde R_{rd} resistencia de radiación del dipolo plegado.

R_r resistencia de radiación de dipolo simple.

N número de radiadores en el dipolo plegado.

Se puede preveer su utilidad en el proceso de acople de impedancia.

Cuando se tiene un arreglo de varias antenas el campo medido en un punto corresponde a la suma vectorial de los campos producidos por cada radiador, de manera que depende de la relación de fases entre ellos y también de la dirección puesto que la señal avanza con velocidad finita. Si se tiene dos radiadores como se indica en la Fig.9.14.2, en los puntos A y B.

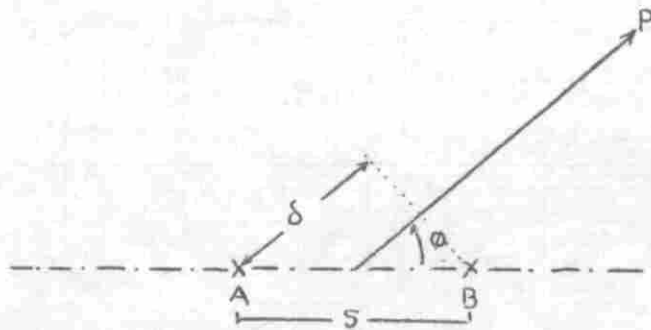
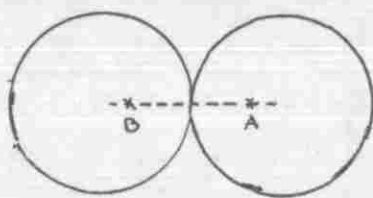


Fig. 9.14.2

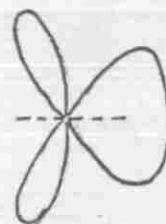
El campo producido en el punto P será:

$$E = E_a^2 + E_b^2 + 2E_a E_b \cos \left(\delta + 2\pi \frac{S}{\lambda} \cos \theta \right) \quad 9.14.2$$



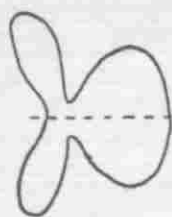
a

$$S \ll \lambda \quad B=180 \\ E_a/E_b=1$$



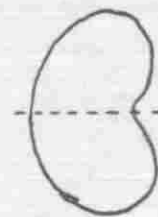
b

$$S=0.75\lambda \quad B=90 \\ E_a/E_b=1$$



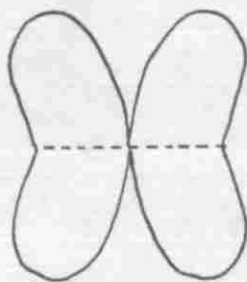
c

$$S=0.75\lambda \quad B=90 \\ E_a/E_b=1.5$$



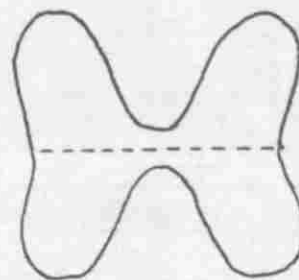
d

$$S=0.25\lambda \quad B=180 \\ E_a/E_b=1$$



e

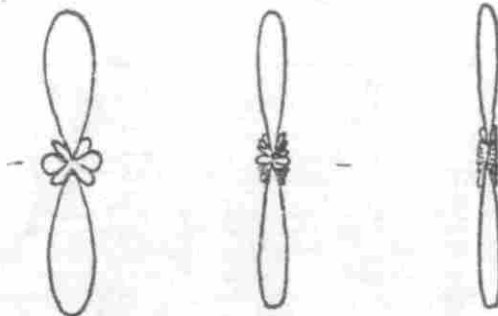
$$S=0.75\lambda \quad B=180 \\ E_a/E_b=1$$



f

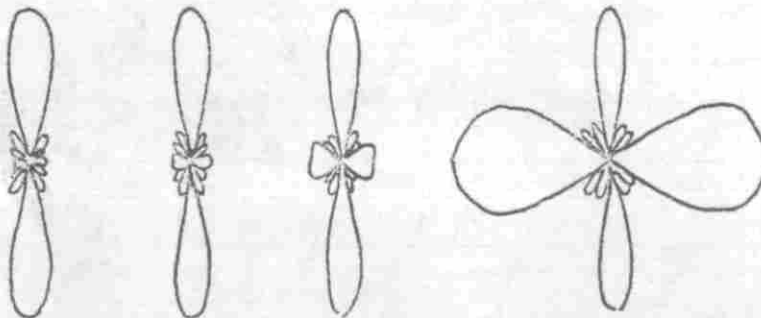
$$S=0.75\lambda \quad B=180 \\ E_a/E_b=1.5$$

Fig. 9.14.3



5 elementos 9 elem. 17 elem.

Modelos de radiación de arreglos con elementos separados $\lambda/2$



muy próximos $\lambda/2$ $3/4$

Modelos de radiación correspondientes a arreglos de antenas con longitud de λ y la separación entre elementos indicada en cada caso

Fig. 9.14.4

donde E_a y E_b son las magnitudes de los campos producidos en P por los radiadores ubicados en A y B respectivamente.

S es la separación de las antenas.

B el ángulo de fase en el cual la corriente en B se atrasa respecto a la corriente en A.

θ dirección angular de P con respecto a la línea que une A y B.

El modelo de radiación resultante de la representación del campo E correspondiente a la ecuación 9.14.2 toma gran variedad de formas correspondientes a los diferentes valores de E_b / E_a , B y S/λ . En la Fig. 9.14.3 se muestra algunos ejemplos de arreglos de dos radiadores. En la figura 9.14.4 se muestra los modelos correspondientes a arreglos de varios elementos. Para facilitar el análisis de arreglos múltiples resulta más apropiado usar radiadores de características iguales, inicialmente considerarlos como isotrópicos para obtener el modelo del arreglo y posteriormente multiplicarlo por el modelo correspondiente a un radiador. Para esto se toma las coordenadas correspondientes a cada absisa y se multiplican entre sí; el modelo así obtenido será el del sistema de antenas.

Como se mencionó al comienzo de este ordinal, se puede hacer uso de antenas pasivas. Si se toma elementos con longitud mayor que $\lambda/2$ su impedancia será de tipo inductivo y para elementos con longitud menor que $\lambda/2$ su impedancia será de tipo capacitivo.

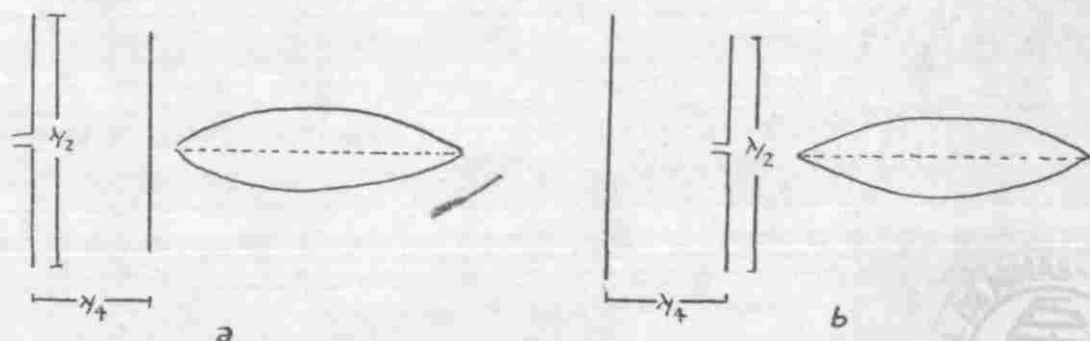


Fig. 9. 14.5

El arreglo mostrado en la Fig. 9.14.5a. produce un modelo de radiación como el mostrado allí mismo razón que permite llamar al elemento pasivo elemento director, pues en esa dirección se refuerza la radiación.

En la Fig. 9.14.5b, se tiene un elemento reflector como elemento pasivo ya que la radiación es reforzada en la dirección opuesta a la ubicación del elemento pasivo. Los efectos de estos arreglos pueden reforzarse superponiendo la acción de un director y un reflector o un reflector y varios directores colocados uno a continuación de otro. Este arreglo constituye la antena Yagi muy útil para la recepción de la señal de televisión. La antena Yagi tiene como elemento activo un dipolo plegado, como el mostrado en la fig. 9.14.1a.